第38卷 第2期
2021年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 2
Mar. 2021

天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应

石仁娜·加汗[1,2,3]， 张同文[2,3]， 喻树龙[2,3]， 姜盛夏[2,3]， 许仲林[1]

（1. 新疆大学资源与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：为研究不同海拔雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）径向生长对气候要素的响应关系，分别在新疆伊犁尼勒克喀什河流域森林低、中、高海拔采集雪岭云杉树芯样本，建立不同海拔雪岭云杉树轮宽度年表。树轮年表与气象资料相关分析结果显示：影响3个采样点树木径向生长的气候因子主要是平均气温和相对湿度，对降水响应微弱。高、低海拔树轮径向生长对气温和相对湿度的响应相同，均对气温正响应，与相对湿度负响应，中海拔则与高低海拔相反。自1991年研究区气候突变后，雪岭云杉径向生长发生"生长分异"，高、低海拔树轮宽度指数呈显著下降，而中海拔呈显著上升。气候突变点前后，树木径向生长主要对气温和相对湿度响应关系不稳定，中海拔对5—9月的气温的正相关和对相对湿度的负相关显著增强，而低、高海拔主要与7—8月的气温转为显著负相关，与1—2月、7—8月相对湿度的正相关显著加强。根据雪岭云杉对气候要素的响应模式，气温的快速升温会加快水分蒸发，相对湿度随之下降，从而引起的干旱加剧对低、高海拔林区雪岭云杉生长产生负面影响，而适宜的增温可能对森林中部雪岭云杉生长具有促进作用。

关键词：天山；雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）；树木年轮；不同海拔；气候变化；分异现象

全球变暖已成为不争的事实，从全球范围来看，北半球中高纬度地区是增温最快的区域[1]。这种升温会影响树木生长，从而改变森林生态系统的结构、功能、碳汇和稳定性[2-3]。随着全球气候变暖加剧，树木生长对气候变化的响应关系发生了改变，出现树轮与气候响应关系不稳定以及树木生长趋势分异等现象[4]，即树轮气候学中的"分异现象"。"分异现象"的出现对基于树轮资料重建的历史气候变化序列的科学性提出了挑战，因此有必要广泛地开展"分异现象"研究，检验不同时期树木生长对气候变化的响应稳定性。

1995年D'Arrigo等[5]正式提出"分异现象"的概念，即树轮宽度或密度对气候变暖的敏感性降低的现象。国内外学者在树木生长与气候关系的研究方面取得一系列进展[6-10]，如Wilmking等[11]研究发现，生长在阿拉斯加山脉高山林线的白云杉径向生长对温度响应存在一个"阈值"。在阈值内，树轮宽度与温度正相关，当温度超过一定的"阈值"后，树轮宽度与温度负相关。在阿尔卑斯高山区研究表明，挪威云杉（*Picea abies*）在20世纪对降水的敏感性增强，而对温度的敏感性降低[12]。于健等[13]研究了长白山落叶松（*Larix olgensis*）对气候变暖的响应差异，发现气温升高和降水增加对树木生长具有显著的抑制作用。随着"分异现象"研究的开展，不同海拔树木生长对气候变化的响应差异也越来越受到重视。Vila等[14]对法国圣姆山的地中海松（*Pinus halepensis*）和樟子松（*Pinus sylvestris*）研究得出，气温上升促进各个海拔地中海松径向生长，但高海拔处樟子松径向生长呈减缓趋势。对长白山不同海拔红松（*Pinus koraiensis*）研究得出，随着气温的持续升高，中、高海拔红松径向生长对生长季气温的正相关逐渐减弱，并有转向负相关的趋势[15]。Zhang等[16]指出在暖湿化背景下，中亚阿拉套山低海拔雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）径向生长对降水的敏感

收稿日期：2020-06-28； **修订日期**：2020-10-17
基金项目：新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2018D04028）；国家自然科学基金项目（41975095，U1803245）；天山青年计划"杰出青年科技人才"（2019Q007）；第二次青藏高原综合科学考察研究子专题（2019QZKK010206）；中央级公益性科研院所基本科研业务经费项目（IDM2018004）资助
作者简介：石仁娜·加汗（1993-），女，硕士研究生，研究方向为自然地理学. E-mail: 1193080242@qq.com
通讯作者：许仲林. E-mail: zlxu@xju.edu.cn

性增强，认为由温度上升引起的干旱胁迫可能是造成"分异现象"的主要原因。张晴等[17]等对天山东部上中下限西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)的分析表明，在气候变暖背景下，树木生长对气温升高的敏感性降低，且低海拔树木径向生长随温度升高而不断减少的特征更为明显。

新疆伊犁位于我国西北干旱区，受大陆性气候及西风环流的影响，是全球气候变化的敏感区和生态系统脆弱区，也是国内最早开展树轮研究的区域之一[18-20]。目前，已有大量研究成果证明，天山不同海拔雪岭云杉对气候要素的响应存在差异[21-22]，但是关于不同海拔雪岭云杉对气候响应稳定性的研究还较为有限。因此，本研究解决以下科学问题：(1)研究气候变化背景下的新疆伊犁喀什河流域树木生长变化趋势；(2)确定不同海拔影响树木径向生长的主要气候限制因子；(3)分析不同海拔树木径向生长对气候要素响应的稳定性。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁尼勒克县喀什河流域(图1)，属典型的温带大陆性气候，流域径流形成类型为降雨融雪混合型。山地植被的垂直地带性分异规律明显，由高海拔至低海拔依次为：冰川积雪、高山垫状植物、高山草原、针叶林、山地草甸草原[23]。其中，山地针叶林带以雪岭云杉占绝对优势，主要分布在1500~2800 m的中山阴坡带[24]，林分以纯林为主，土壤为山地灰褐色森林土[25]。雪岭云杉年轮界限清晰易辨认，对气候变化有较好的敏感性，是树轮气候学分析的理想树种[26]。

1.2 样本采集与年表建立

在新疆伊犁尼勒克县喀什河流域森林自上而下布设3个采样点(表1)，样本采集严格按照树木年代学基本原理[27]，使用生长锥在树木胸高处1.3 m位置沿垂直坡向和平行坡向分别钻取2个树芯，共钻取73棵树，采集146个样芯。将样芯带回实验室，进行干燥、固定、打磨、目测定年，用精度0.001 mm的LINTAB5年轮宽度仪测量树轮宽度。使用COFFCHA程序检验树轮宽度数据[28]，消除定年和测量中出现的错误，并剔除不适宜样芯，确保准确判定每个年轮的形成年份。再用ARSTAN年表研制程序中负指数函数方法去除序列的生长趋势，用双权重平均法进行年轮曲线的标准化处理，最终得到3种轮宽度年表，即标准化年表、差值年表和自回归年表[29]，其中，标准化年表包含较多的高频信息和丰富的低频信息，可以在多尺度上反映气候变化信息[30]，因此，选择该类型年表分析树轮年表与气

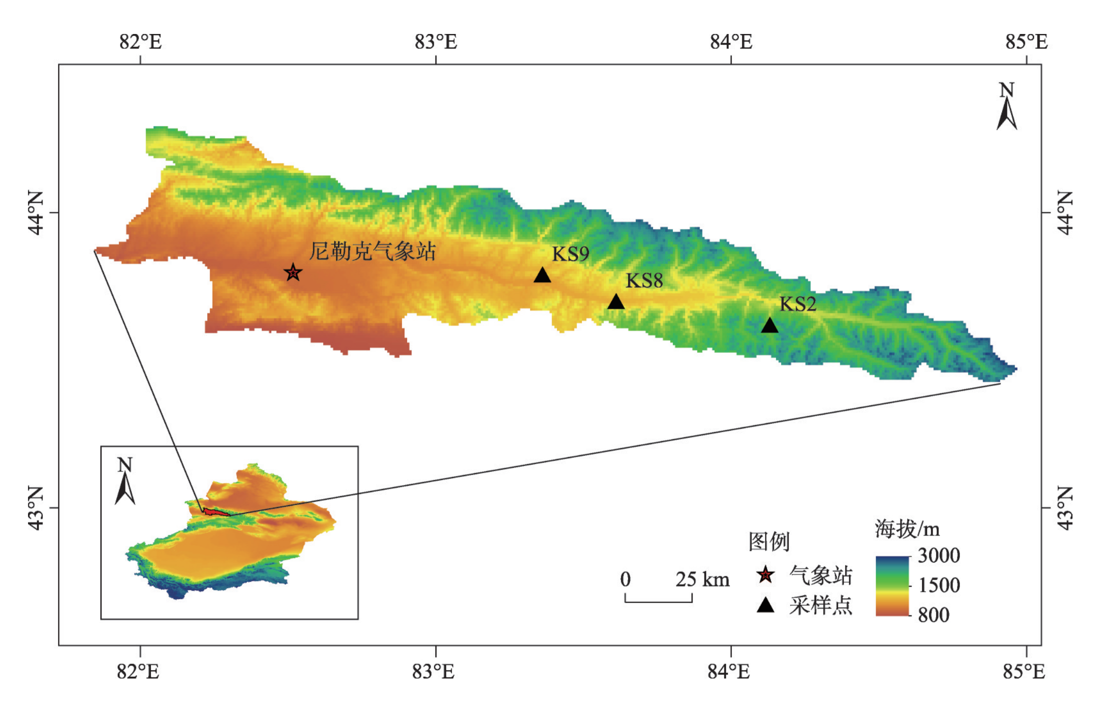


图1 采样点及附近气象站位置示意图

Fig. 1 Location of sampling sites and meteorological station

表1　树轮采样点信息

Tab. 1　Information about the tree-ring sampling sites

采样点	年表代号	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	坡向	坡度/(°)	样本量
尼勒克县喀什河9	KS9	43.79°	83.36°	1614	WWN	30	22棵/44个
尼勒克县喀什河8	KS8	43.70°	83.61°	1804	WWN	30	25棵/50个
尼勒克县喀什河2	KS2	43.62°	84.13°	2400	E	30	26棵/52个

候要素的响应关系。

1.3 气象资料

选取距采样点最近的尼勒克气象站(43°48′N、82°31′E,海拔1106 m)1959—2017年的气候资料,所用气候要素包括月平均气温、月降水量和月平均相对湿度(图2)。1959—2017年尼勒克地区年平均气温为6.5 ℃,最高气温在7月(19.5 ℃),最低气温在12月(−6.8 ℃),年降水量为389 mm,时间分配不均,主要集中在4—8月,占全年降水量的60%,气候环境表现为雨热同期。自1959年以来,年平均气温、年降水量分别以0.418 ℃·$(10a)^{-1}$、20.985 mm·$(10a)^{-1}$的速率显著上升,而年平均相对湿度以0.608 %·$(10a)^{-1}$的速率显著下降。使用Mann-Kendall方法对气象数据进行突变检验,结果显示年平均气温、年降水量、年平相对湿度分别在1997年、1991年、2007年发生突变(图3)。以最早出现突变年份(1991年)为依据,将气象数据等分为2个时段1964—1990年和1991—2017年进行对比(图2),结果显示:1964—1990年年均温以0.552 ℃·$(10a)^{-1}$的速率显著上升,1991—2017年年均温以0.699 ℃·$(10a)^{-1}$的速率显著上升,升温速率较前半时段更为明显,降水量在前后时段呈缓慢增加趋势,基本保持稳定,相对湿度在1959—1991年呈微弱下降,但在1991—2017年以2.572%·$(10a)^{-1}$的速率呈显著下降,研究区气候总体表现为暖干化变化趋势。

1.4 研究方法

选用一元线性拟合方法,建立一元回归方程,分析气象数据和树轮年表的变化趋势及变化倾向率。选择Mann-Kendall非参数统计检验方法检验气象数据的突变点及突变年份。应用SPSS软件计算

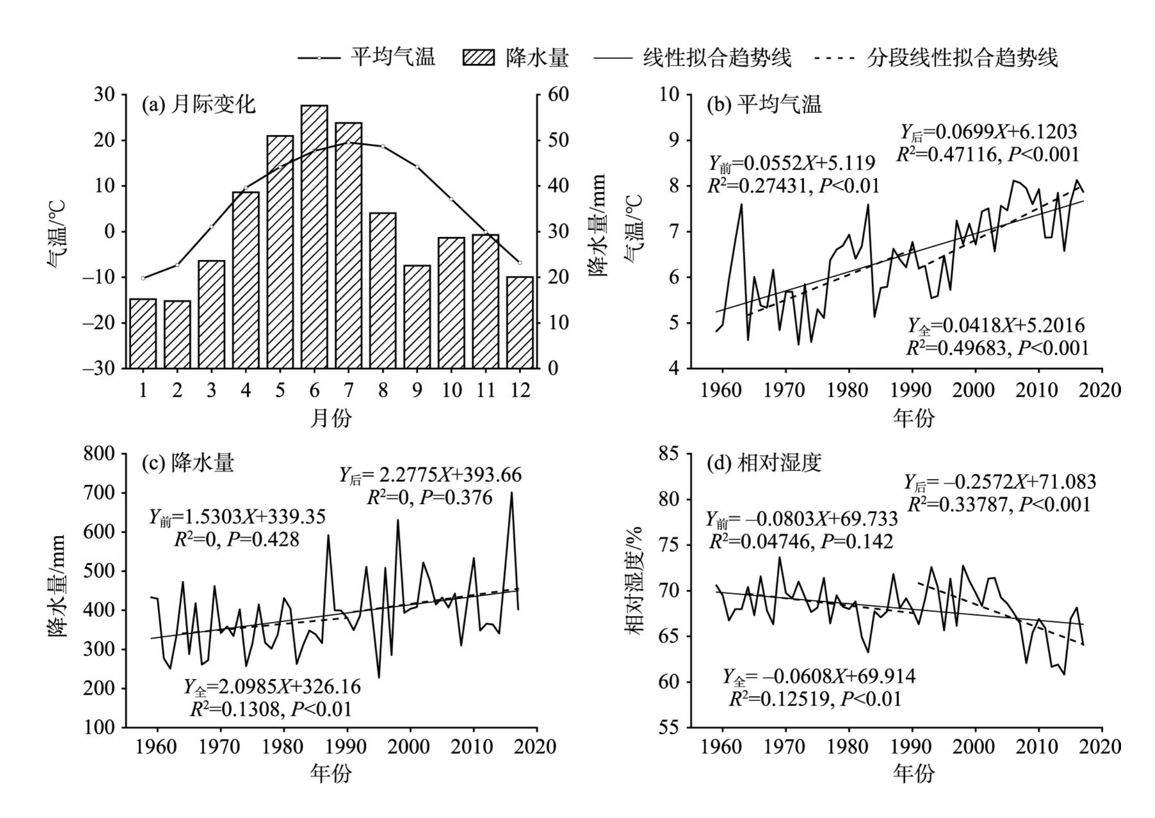


图2　尼勒克气象资料的变化

Fig. 2　Variations in the climate characteristics of Nileke

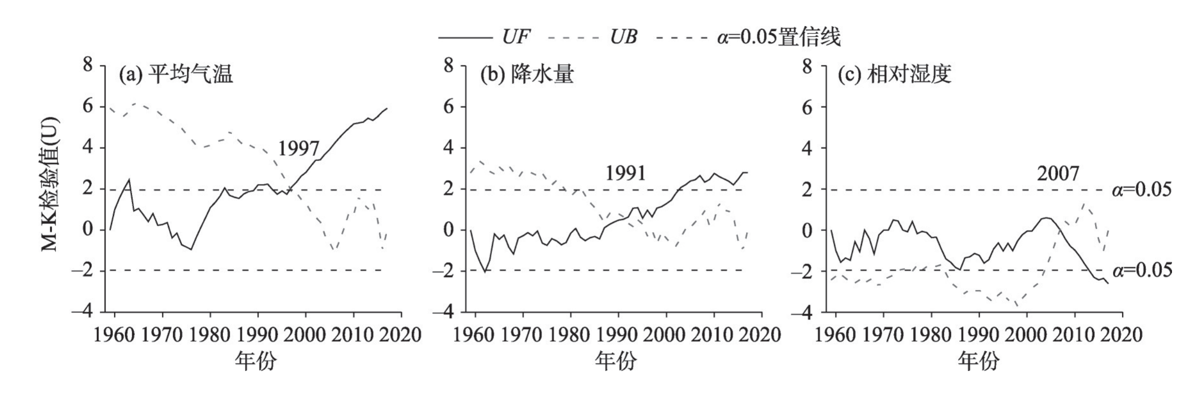


图3 1959—2017年尼勒克气象资料Mann-Kendall突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall mutation test value of annual meteorological data in Nileke during the period of 1959–2017

树轮年表与气象数据的Pearson相关系数，分析树木径向生长对气候要素的响应。采用Dendroclim 2002程序中的滑动相关函数，分析树轮年表与各气象要素关系的动态变化(滑动窗口设为34 a，每次滑动1 a)，在P=0.05水平下对其进行显著性检验。

2 结果分析

2.1 树轮年表特征分析

由表2可知，平均敏感度(MS)是判断年表优劣的重要指标，敏感度值越大，气候因子限制作用越强，含有的气候信息量越多。3个年表平均敏感度在0.137~0.188之间，表现为随海拔升高呈递减趋势，与天山其他区域研究结果一致[31]。信噪比(SNR)是年表承载气候信息量的指标，一般认为大于4的年表较优[32]，其值介于11.242~23.905之间，均大于4。样本总代表性(EPS)均超过0.85的最低阈值，说明3个采样点的年表能代表研究区雪岭云杉生长的基本特征[33–34]。一阶自回归系数(AC1)均较高，分别为0.562、0.812和0.699，说明树木径向生长均受上年气候因子的影响[35]。3个年表在公共区间内(1880—2017年)的互相关系数均达到显著水平，随海拔上升，年表之间的互相关系数降低(表3)。不同海拔树轮宽度指数变化趋势显示(图4)，高中低海拔均呈增加趋势，但高海拔增加显著。对比1964—1990年和1991—2017年两个时段树轮宽度指数变化趋势(图4)结果显示：在前一个时段高低海拔呈相反趋势，低海拔缓慢增加，高海拔缓慢下降，在后一个时段，高低海拔变化趋于一致，均呈显著下降趋势，而中海拔则与高低海拔相异，在前一时段缓慢增加，后一时段呈显著增加趋势。由此可见，在降水突变前后，研究区不同海拔高度的雪岭云杉具有不同的生长趋势。

表2 不同海拔雪岭云杉标准年表统计特征值

Tab. 2 Statistical features of tree ring width standardized chronology at different altitudes

年表特征	KS9	KS8	KS2
平均敏感度(MS)	0.188	0.159	0.137
标准差(SD)	0.246	0.344	0.271
样本相关系数($r1$)	0.503	0.219	0.342
树内相关系数($r2$)	0.599	0.326	0.397
树间相关系数($r3$)	0.425	0.162	0.315
一阶自回归系数(AC1)	0.562	0.812	0.699
信噪比(SNR)	23.249	11.242	23.905
样本总代表性(EPS)	0.959	0.918	0.960
EPS>0.85起始年	1880	1780	1800

表3 不同海拔树轮宽度标准化年表相关系数(1880—2017年)

Tab. 3 Correlations of standardized chronology of tree ring width at different altitudes(1880–2017)

年表代号	KS9	KS8	KS2
KS9	1		
KS8	0.347**	1	
KS2	0.220**	0.180*	1

注：*表示在0.05水平上差异显著(P<0.05)，**表示在0.01水平上差异显著(P<0.01)。

2.2 不同海拔树轮宽度与气候要素相关关系

考虑到气候要素对树木径向生长的“滞后效应”，即树木径向生长受到当年及上一年气候条件的影响，在本研究中选取了上年6月至当年10月的气象数据[36–37]，分析了不同海拔树轮年表与气候要素的相关关系(图5)。

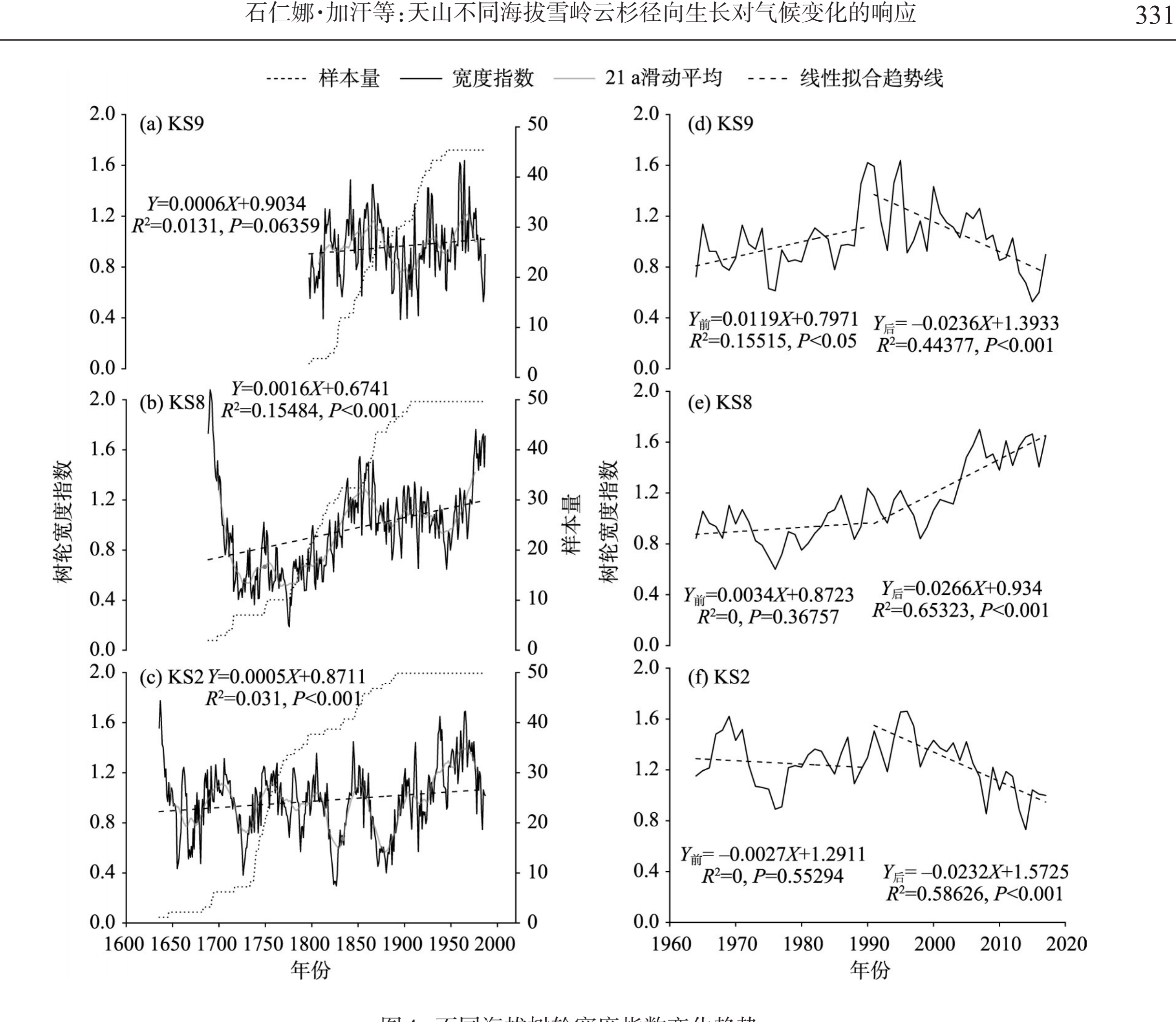


图4 不同海拔树轮宽度指数变化趋势

Fig. 4 Trends of tree-ring width index at different altitudes

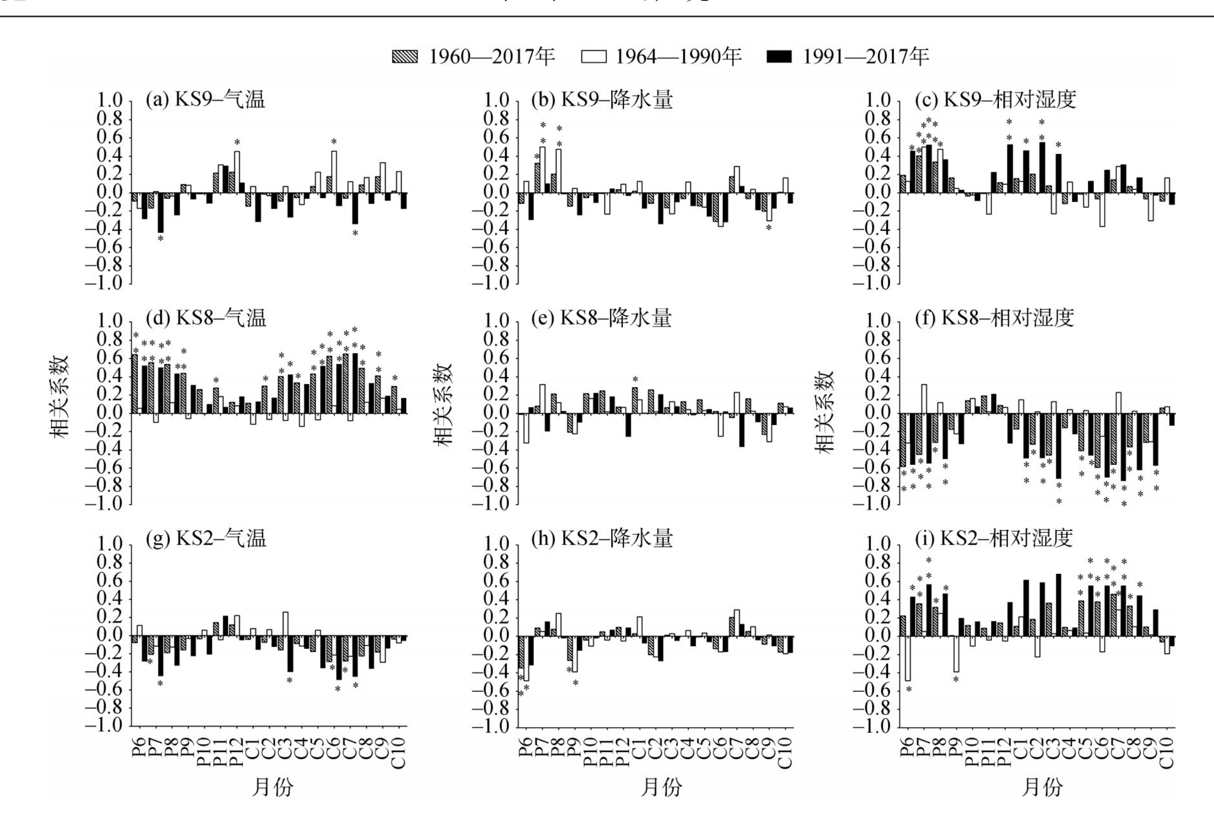
1960—2017年不同海拔树轮宽度年表与气候因子相关结果显示:温度响应方面,高低海拔表现基本一致,与上年6—8月气温均为负相关,高海拔响应更明显,与上年7月和当年6—7月气温呈显著负相关,而中海拔年表总体上与气温为显著正相关。逐月降水量方面,中低海拔为正响应,而高海拔呈负响应。低海拔年表与上年7月降水显著正相关,中海拔年表与当年1月降水显著正相关,高海拔年表与上年6月、9月降水显著负相关。相对湿度响应方面,高低海拔均与上年7—8月相对湿度显著正相关,而中海拔年表与多数月的相对湿度显著负相关。除此之外,低海拔与当年1—3月相对湿度呈显著正相关,高海拔与当年5—8月相对湿度呈显著正相关。

对降水突变点前后不同海拔树轮宽度年表与气候因子进行相关分析,发现降水突变前(1964—1990年),3个采样点树木生长对气候要素响应相对较弱,且变化规律不明显,仅表现为低海拔年表与上年12月和当年6月气温显著正相关,与上年7—8月的降水和相对湿度显著正相关,高海拔年表与上年6月和9月降水显著负相关。

降水突变后(1991—2017年),高低海拔与大多数月的气温为负相关,均与上年及当年7月气温显著负相关,而中海拔年表对气温总体呈显著正相关。树木径向生长与相对湿度的相关性与温度表现为相反变化,高低海拔均与上年6—7月相对湿度显著正相关,中海拔对相对湿度整体呈显著负相关。此外,低海拔年表与上年12月至当年3月的相对湿度显著负相关,高海拔年表与当年5—8月的相对湿度显著正相关。

2.3 不同海拔树轮宽度与气候要素动态关系

不同海拔树轮年表与气候要素的滑动相关结果显示(图6),3个采样点树木径向生长在1981年后对7—8月气温的敏感性有所增强,高低海拔由正



注：P为前一年，C为当年；*表示在0.05水平上差异显著（$P<0.05$），**表示在0.01水平上差异显著（$P<0.01$）。下同

图5 不同海拔树轮宽度年表与气象资料的相关分析

Fig. 5 Correlations between the tree-ring width chronology and the meteorologica data at different altitudes

相关转显著负相关，而中海拔对气温总体呈正相关显著增强。此外，低海拔与5—6月气温的正相关在1976年后减弱，高海拔与当年6月气温也由正相关转显著负相关。同样，树木生长在1981年后均对当年1—2月及当年7月的相对湿度的敏感性增强，高低海拔呈正相关显著增强，而中海拔总体呈负显著加强。另有，低海拔与上年7—8月相对湿度明显增强，高海拔与上年6—8月相对湿度的正相关出现逐渐加强再减弱的变化。不同海拔与降水也存在较为不稳定响应关系，高低海拔与当年2月降水的负相关在1979年后显著加强，中高海拔与上年9月降水的负相关在1980年后减弱，中低海拔与当年9月降水的负相关在1975年后减弱。

3 讨 论

3.1 不同海拔雪岭云杉径向生长与气候因子的响应差异

海拔作为影响树木生长的一个重要的生态因子，往往造成热量和水分的重新分配，使树木生长环境更为复杂[38]。不同海拔树木生长对气候要素的响应，普遍认为低海拔树木生长与降水正相关，高海拔树木生长与温度正响应[39]。但在天山西部伊犁地区，由于部分地区水热组合配比较复杂，很难确定限制树木径向生长的主要气候因子[40]。因此，本研究针对新疆伊犁喀什河流域不同海拔雪岭云杉径向生长与气候要素的关系做进一步的了解。

树木径向生长对温度响应方面，高低海拔表现基本一致，与上年6—8月气温均为负相关，高海拔响应更明显，与上年7月和当年6—7月气温显著负相关。从树木生理学上讲，上年生长季6—8月的高温容易导致树木蒸腾作用加强，降水量若不能满足树木正常生长所需，会消耗体内储存的水分来满足生长需求，进而影响第二年树木生长速率[41]。李淑娟等[42]在西天山研究同样发现，高低海拔雪岭云杉径向生长明显受制于温度，与上年6—9月显著负相关。其次，在高海拔处，太阳辐射较为强烈，6—7月辐射强度尤为突出，高温会加剧土壤水分蒸发，增强植被的光合作用和蒸腾作用，造成树木水分供应不足，从而抑制其生长[43]。这与天山北坡森林上限雪岭云杉的研究结果较为一致[44]。高海拔年表与

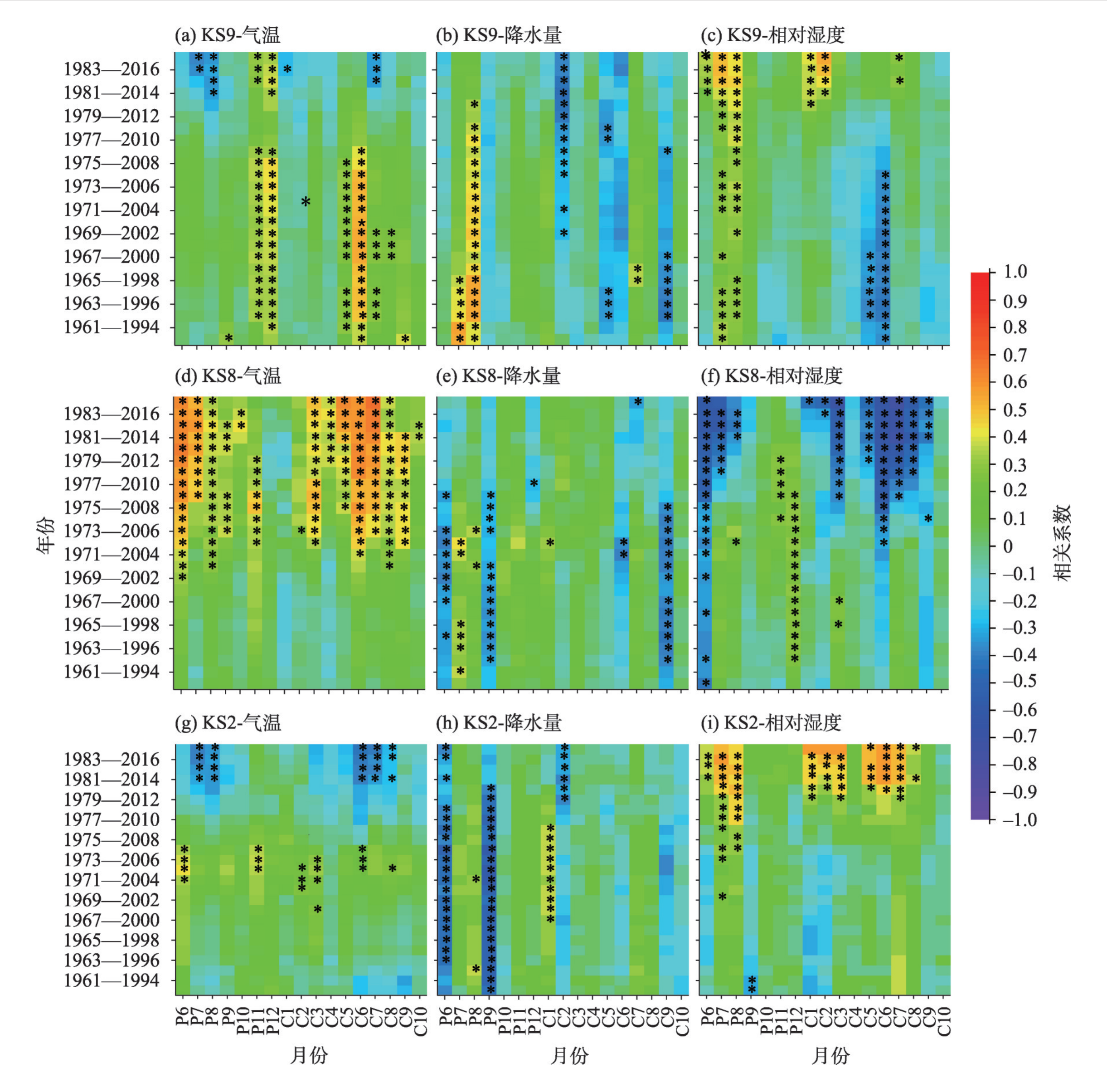


图6 不同海拔树轮宽度年表与气象资料滑动相关

Fig. 6 Moving correlation between the tree-ring width chronology and meteorologica data at different altitudes

温度的负相关,从一个侧面反映出雪岭云杉喜湿润环境,其生长主要受土壤水分影响的特性。然而这与普遍认为的"高海拔树木生长与温度呈正相关"的结论存在一定差异,彭剑锋等[45-46]研究则认为,森林上限树木生长的限制因素存在区域差异。

中海拔明显与不同于高低海拔,与上年6—9月及当年5—9月的气温呈显著正相关。从年表特征值来看(表2),中海拔与高低海拔存在一定差异,这可能是由于最大降水带在森林中部、局地小地形或小气候等小生境的差异造成中海拔与高低海拔的响应模式不同。雪岭云杉主要生长期在5—9月[47],尼勒克气象站5—9月的平均气温为16.8 ℃,利用山地温度垂直递减率0.56 ℃·(100m)$^{-1}$[48],计算得到采样点平均气温大约为12.8 ℃,仅达到雪岭云杉的最适生长温度下限阈值[49],因此适宜的增温,反而有利于树木生长。天山北坡中山带1900~2200 m附近存在最大降水带[50],采样点海拔在1804 m,较为接近最大降水带,相对其他采样点该区域降水可能更为充沛。在水分充足条件下,较高的温度反而有利于植物进行光合作用,促进树木生长。

树木径向生长对降水的响应相对较弱,中低海拔对降水呈正响应,高海拔呈负响应。低海拔与上年7月降水显著正相关,中海拔与当年1月降水显著正相关。从树木生理学上讲,上年7月和1月的较好的降水(雪)条件,有益于营养物质的积累及土壤水分涵养,为第二年春材部分的生长提供有利条

件[51]，与天山其他区域的研究结论相一致[52-53]。但高海拔与上年6月、9月降水显著负相关，随海拔升高，温度下降，对于水分相对充沛的高海拔林区而言，过多的降水不利于营养物质的累积和木质化的进程。树木径向生长对相对湿度和温度的响应关系呈反位相，高低海拔均与上年7—8月相对湿度显著正相关，而中海拔与多数月的相对湿度显著负相关。相对湿度反映空气中水汽含量多少[54]，主要体现水分信息[23]，它会通过影响水分蒸发、植被蒸腾及光合作用而影响树木生长。因此可以进一步说明高低海拔雪岭云杉径向生长主要受水分条件的限制，而中海拔径向生长主要受温度的限制。

3.2 不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应差异

不同海拔水热分配随气候变化而变化，因此生境条件的改变对树木生长产生一定的影响[55]。研究区降水突变（1991年）前后不同海拔树轮宽度年表与气候因子相关分析（图5）及滑动相关分析（图6），结果显示：不同海拔雪岭云杉径向生长与气候因子存在不稳定响应关系，主要对7—8月的温度和相对湿度的敏感性增强。

高低海拔径向生长对温度和相对湿度的不稳定呈反位相，高低海拔主要与上年7—8月和当年7月气温由正相关转为显著负相关，同时与上年7—8月和当年1月、2月、7月相对湿度的正相关显著增强。随着气温快速升温，7月、8月高温对雪岭云杉径向生长的抑制作用最明显。这是因为7—8月是尼勒克一年中最热的时期，较高的气温会加快林内水分的蒸发，相对湿度也会随之下降，进而增强了植被的蒸腾作用和光合作用，加快了树木体内水分散失，从而对其径向生长不利。1—2月是雪岭云杉树木生长季前期，此时树木生长基本停止，但仍能进行一定的光合作用，该时段湿润的条件有利于积累光合产物，为树木早材部分的快速生长具有促进作用[56]，气温显著升高加快了水分的蒸发速度，水分对树木的限制作用逐渐突显出来，即出现当年1—2月相对湿度与树木径向生长为正相关显著增强趋势。具体表现为高低海拔雪岭云杉树轮宽度指数在1991年前后出现“生长分异”现象，随着气温快速升高，树轮宽度指数呈显著下降（图4），说明升温引起的暖干化的气候环境不利于高低海拔树木生长。由此推测温度上升易致使蒸发加剧，而引起的“干旱胁迫”可能是造成高低海拔树木生长分异的主要原因，因此可以认为7—8月升温而引起的水分亏缺是限制高低海拔树木径向生长的主要因素。在对祁连山青海云杉、阿尔泰山的西伯利亚落叶松和西伯利亚云杉同样发现，气候变暖背景下，水分对树木生长的限制作用会随温度升高而逐渐突出[57-59]。

中海拔明显不同于高低海拔，中海拔年表主要与上年6—8月和当年5—8月的平均气温的正相关显著增强，同时与上年6—8月和当年5—9月的相对湿度的负相关显著增强，具体表现为树木径向生长随气温升高呈显著上升趋势（图4）。基于垂直递减率计算的1991—2017年5—9月平均气温大约为13.6 ℃，并未超过最适生长温度阈值。林中采样点较为接近天山北坡中山带的最大降水带，且降水量有上升趋势，对于水分相对充足的中部林区而言，气温上升有益于土壤水分蒸发和植被的光合作用[46]，促进林中树木生长，这与东天山西伯利亚落叶松研究结果一致[17]，说明研究区气候暖干化趋势有益于中海拔树木生长。

4 结 论

（1）不同海拔树轮年表均含有较多的环境信息且能代表研究区雪岭云杉径向生长的基本特征。气候发生突变后，高、低海拔树轮宽度呈下降趋势，而中海拔呈上升趋势，雪岭云杉径向生长发生“生长分异”现象。

（2）不同海拔树轮宽度年表与气候要素的响应分析结果表明，高低海拔雪岭云杉径向生长主要受水分条件限制，中海拔径向生长主要受温度条件限制。

（3）研究区的气候发生突变前后，树木径向生长主要对气温和相对湿度响应关系不稳定。具体表现为低、高海拔树轮年表主要与7—8月气温的负相关关系显著增强，与1—2月、7—8月相对湿度的正相关也随之不断增强。中海拔树轮年表与气温总体为正相关明显增强，与相对湿度负相关也随之加强。

气候变暖背景下，研究区快速升温导致蒸发加强，从而引起的干旱加剧可能对低、高海拔林区雪岭云杉生长产生负面影响，而适宜的增温可以促进

中海拔林区的树木生长。总之，在西天山喀什河流域开展树轮的气候重建工作时需要检测树木生长与气候要素的响应稳定性，更需要我们密切关注气候变化对森林生态系统发展趋势的影响。

参考文献(References)：

[1] 季飞. 北半球中高纬干旱半干旱区强化增温现象研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Ji Fei. Enhanced Arid and Semi-arid Warming over Mid-high Latitudes of Northern Hemesphere[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[2] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71−78. [Liu Guohua, Fu Bojie. Effects of global climate change on forest ecosystems[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 71−78.]

[3] Wu X, Liu H, Wang Y, et al. Prolonged limitation of tree growth due to warmer spring in semi-arid mountain forests of Tianshan, northwest China[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 024016.

[4] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 等. 树轮气候学中分异现象的研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 453−460. [Gao Linlin, Gou Xiaohua, Deng Yang, et al. An overview of the divergence phenomenon in dendroclimatology[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 453−460.]

[5] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the 'Divergence Problem' in Northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes[J]. Global Planetary Change, 2008, 60(3−4): 289−305.

[6] Wilmking M, Juday G P, Barber V A, et al. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1724−1736.

[7] Kurz-Besson C B, Lousada J L, Gaspar M J, et al Effects of recent minimum temperature and water deficit increases on *Pinus pinaster* radial growth and wood density in southern portugal[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 7(12): 1170−1170.

[8] 李广起, 白帆, 桑卫国. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 500−511. [Li Guangqi, Bai Fan, Sang Weiguo. Different responses of radial growth to climate warming in *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 500−511.]

[9] 赵学鹏, 白学平, 李俊霞, 等. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 637−647. [Zhao Xuepeng, Bai Xueping, Li Junxia, et al. Response of *Larix olgensis* at different elevations to climate change in the context of climate warming[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 637−647.]

[10] 杨绕琼, 范泽鑫, 李宗善, 等. 滇西北玉龙雪山不同海拔云南松(*Pinus yunnanensis*)径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8983−8991. [Yang Raoqiong, Fan Zexin, Li Zongshan, et al. Radial growth of *Pinus yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors in the Yulong Snow Mountain, Northwest Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8983−8991.]

[11] Wilmking M, Juday G P, Barber V A, et al. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1724−1736.

[12] Ulf Büntgen, Frank D C, Schmidhalter M, et al. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology[J]. Trees, 2006, 20(1): 99−110.

[13] 于健, 徐倩倩, 刘文慧, 等. 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 24−35. [Yu Jian, Xu Qianqian, Liu Wenhui, et al. Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 24−35.]

[14] Vila B, Vennetier M, Ripert C, et al. Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensisat* their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France)[J]. Annals of Forest Science, 2008, 65(7): 709−709.

[15] 周子建, 江源, 董满宇, 等. 长白山北坡不同海拔红松径向生长−气候因子关系对气温突变的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4668−4676. [Zhou Zijian, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4668−4676.]

[16] Zhang T, Zhang R, Jiang S, et al. On the 'Divergence Problem' in the Alatau Mountains, Central Asia: A study of the responses of schrenk spruce tree-ring width to climate under the recent warming and wetting trend[J]. Atmosphere, 2019, 10(8): 473.

[17] 张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 14−25. [Zhang Qing, Yu Ruide, Zheng Hongwei, et al. Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the Eastern Tianshan Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(1): 14−25.]

[18] 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 等. 用树木年轮重建天山北坡中西部7~8月379 a的降水量[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 404−410. [Yu Shulong, Yuan Yujiang, Jin Hailong, et al. A 379−year July−August precipitation series reconstructed from tree-ring on the mid-western part of the Northern Slopes of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 404−410.]

[19] 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴仑台地区过去645年来的降水变化[J]. 地理科学, 2011,

31(2): 251−256. [Zhang Tongwen, Wang Lili, Yuan Yujiang, et al. A 645−year precipitation reconstruction in Baluntai egion on southern slope of mid-Tianshan Mountains based on tree-ring width[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 31(2): 251−256.]

[20] 齐元元, 尚华明, 张瑞波, 等. 利用树轮重建玛纳斯河流域过去289 a降水变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 942−949. [Qi Yuanyuan, Shang Huaming, Zhang Ruibo, et al. The 289−year variation of precipitation reconstructed with tree-ring data in the Manas River Basin[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 942−949.]

[21] 彭正兵, 李新建, 张瑞波, 等. 不同去趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1595−1604. [Peng Zhengbing, Li Xinjian, Zhang Ruibo, et al. The response of tree-ring chronologies of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) to climate change at high-and low-elevations of the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, using different detrending methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1595−1604.]

[22] Jiao L, Jiang Y, Wang M, et al. Responses to climate change in radial growth of *Picea schrenkiana* along elevations of the eastern Tianshan Mountains, northwest China[J]. Dendrochronologia, 2016, 40: 117−127.

[23] 张瑞波. 基于树轮的中亚西天山干湿变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Zhang Ruibo. Tree-Ring-Based Droughts Variability in Western Tianshan Mountains[D]. Lanzhou: lanzhou University, 2017.]

[24] 霍玉侠. 树轮宽度记录的新疆北疆地区气候变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Huo Yuxia. Tree-Ring Width Records of Past Climate Variability in North Xinjiang[D]. Lanzhou: lanzhou University, 2017.]

[25] 杜海燕, 常顺利, 宋成程, 等. 天山雪岭云杉森林菌根真菌多样性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1194−1201. [Du Haiyan, Chang Shunli, Song Chengcheng, et al. Diversity of mycorrhizal fungi of *Picea schrenkiana* forest and its affecting factors in the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1194−1201.]

[26] 伊建平, 张海州, 李留振, 等. 天山中部雪岭云杉树木年轮宽度与气候因子关系[J]. 林业建设, 2008(2): 48−51. [Yi Jianping, Zhang Haizhou, Li Liuzhen, et al. Relationship between tree-ring width of *Picea schrenkiana* and climatic factors in the middle area of Tianshan mountain[J]. Forestry Construction, 2008(2): 48−51.]

[27] Stokes M A. An Introduction to Tree-Ring Dating[M]. Arizona: University of Arizona Press, 1996: 1−61.

[28] Douglass A E. Crossdating in Dendrochronology[J]. Journal of Forestry-Washington, 1941, 39(10): 825−831.

[29] Evin J. Tree ring and climate [J]. Geobios, 1977, 10(2): 315−318.

[30] 王波, 陈拓, 徐国保, 等. 祁连山中部祁连圆柏林线树木生长与积雪响应关系研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 318−326. [Wang Bo, Chen Tuo, Xu Guobao, et al. The relationships between snow cover and *Sabina przewalskii* radial growth at alpine timberlines in the middle Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 318−326.]

[31] 喻树龙, 李淑娟, 姜盛夏, 等. 天山北坡雪岭云杉树轮宽度年表梯度特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2): 1−9. [Yu Shulong, Li Shujuan, Jiang Shengxia, et al. Gradient chronology features of *Picea schrenkiana* in the north slope of Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(2): 1−9.]

[32] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology[M]. Holland: Springer, Dordrecht, 1990.

[33] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. Journal of Climatology & Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201−213.

[34] 杨美琳, 他志杰, 吴燕良, 等. 树轮宽度记录的塔吉克斯坦北部160 a平均最低气温变化[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 290−295. [Yang Meilin, Ta Zhijie, Wu Yanliang, et al. Tree-ring-based reconstruction of minimum temperature in North Tajikistan in recent 160 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 290−295.]

[35] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 1994, 49(2): 174−181. [Shao Xuemei, Wu Xiangding. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* Franch from Huashan, China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(2): 174−181.]

[36] 高露双, 赵秀海, 张赟. 温度、降水与树木径向生长关系研究现状[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(4): 76−79. [Gao Lushuang, Zhao Xiuhai, Zhang Yun. Researches situation on relation between temperature and precipitation and tree diameter increment[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2007, 27(4): 76−79.]

[37] 张艳静, 郑宏伟, 于瑞德, 等. 天山中西段不同地区雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 植物研究, 2017, 37(3): 340−350. [Zhang Yanjing, Zheng Hongwei, Yu Ruide, et al. Response differences of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in midwestern Tianshan Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(3): 340−350.]

[38] 曹宗英, 勾晓华, 刘文火, 等. 祁连山中部青海云杉上下限树轮宽度年表对气候的响应差异[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 29−34. [Cao Zongying, Gou Xiaohua, Liu Wenhuo, et al. Response of tree-ring to the climate factors at upper and lower elevation in the middle region of Qilian Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(7): 29−34.]

[39] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 83−85. [Wu Xiangding. Tree Rings and Climate Change[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 83−85.]

[40] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 1−9. [Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Research advances of dendroclimatology in Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(4): 1−9.]

[41] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 345−351. [Fan Weiyi, Wang Xiao’

an. Advances in studies on the relationships between tree-ring width and climatic factors[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(2): 345–351.]

[42] 李淑娟, 喻树龙, 尚华明, 等. 新疆西天山不同海拔雪岭云杉树轮宽度年表特征及其气候响应分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 50–57. [Li Shujuan, Yu Shulong, Shang Huaming, et al. Tree-ring chronology features and climatic response of *Picea schrenkiana* along altitude gradient in the West Tianshan Montains, China[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(1): 50–57.]

[43] 黄小梅, 肖丁木, 秦宁生. 基于树轮宽度的澜沧江源区干旱重建[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 280–289. [Huang Xiaomei, Xiao Dingmu, Qin Ningsheng. Drought reconstruction based on tree-ring width in headwaters of the Lancang River[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 280–289.]

[44] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 天山北坡东部树轮宽度和稳定碳同位素的环境响应分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(5): 6–10. [Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Environmental response of tree-ring width and stable carbon isotope at North Slope of Eastern Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2010, 4(5): 6–10.]

[45] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 460–465. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. Climatic records of tree-ring width in *Picea schrenkiana* Fisch and *Larix sibirica* Ledb[J]. Ecology and Environment Sciences, 2005, 14(4): 460–465.]

[46] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2723–2731. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu. et al. The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledb to climatic change in eastern Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2723–2731.]

[47] 桑卫国, 王云霞, 苏宏新, 等. 天山云杉树轮宽度对梯度水分因子的响应[J]. 科学通报, 2007, 52(19): 2292–2298. [Sang Weiguo, Wang Yunxia, Su Hongxin, et al. Response analysis between tree-ring widths and climatic factors to gradient moisture factor in Tianshan Mountains Northwestern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(19): 2292–2298.]

[48] 张永香, 邵雪梅, 徐岩, 等. 利用生理模型模拟的柴达木东北缘祁连圆柏对气候要素的响应过程[J]. 科学通报, 2011, 56(12): 975–982. [Zhang Yongxiang, Shao Xuemei, Xu Yan, et al. Process based modeling analyses of *Sabina przewalskii* growth response to climate factors around the northeastern Qaidam Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(12): 975–982.]

[49] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德, 等. 基于树轮生理模型的雪岭云杉径向生长的模拟研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 64–71. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide, et al. Process-based modeling radial growth of *Picea schrenkiana* in the eastern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 64–71.]

[50] 张山清, 普宗朝. 基于DEM的乌鲁木齐河流域降水量时空变化分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 437–443. [Zhang Shanqing, Pu Zongchao. Analysis of precipitation change characteristic in Urunqi River Basin based on DEM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(3): 437–443.]

[51] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 863–870. [Zhu Haifeng, Wang Lili, Shao Xuemei, et al. Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 863–870.]

[52] 齐元元, 魏文寿, 袁玉江, 等. 玛纳斯河流域不同海拔树轮宽度年表特征及其对气候响应的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(6): 36–41. [Qi Yuanyuan, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Characteristics of tree-ring width chronologies and their response to climate for different elevations in Manasi River Basin[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(6): 36–41.]

[53] 张录, 袁玉江, 魏文寿, 等. 1671—2006年伊犁尼勒克地区7—8月降水序列的重建与分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 914–920. [Zhang Lu, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Reconstruction and analysis of the 336–a July and August precipitation series in Nilka County, Xinjing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 914–920.]

[54] 徐国保, 刘晓宏, 秦大河, 等. 树木年轮$\delta^{18}O$记录的中国西北阿尔泰山区相对湿度变化[J]. 科学通报, 2014, 59(15): 1478. [Xu Guobao, Liu Xiaohong, Qin Dahe, et al. Relative humidity reconstruction for northwestern China's Altay Mountains using tree-ring $\delta^{18}O$[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(15): 1478.]

[55] Fritts H C, Smith D G, Cardis J W, et al. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in Northern Arizona[J]. Ecology, 1965, 46(4): 394–401.

[56] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的伊犁地区近354年帕尔默干旱指数变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 355–362. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Variations of long-term Palmer drought index in recent 354 years in Yili based on tree-ring record[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 355–362.]

[57] 雷静品, 封晓辉, 施征, 等. 海拔梯度上青海云杉径向生长与气候关系稳定性研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(12): 2518–2529. [Lei Jingpin, Feng Xiaohui, Shi Zheng, et al. Stability of relationship between climate and *Picea crassifolia* radial growth in different elevations[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(12): 2518–2529.]

[58] 焦亮, 王玲玲, 李丽, 等. 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的分异响应[J]. 植物生态学报, 2019, 43(4): 320–330. [Jiao liang, Wang Lingling, Li Li, et al. Divergent responses of radial growth of *Larix sibirica* to climate change in Altay Mountains of Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology 2019, 43(4): 320–330.]

[59] 刘蕊, 王勇辉, 姜盛夏, 等. 哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 723–733. [Liu Rui, Wang Yonghui, Jiang Shengxia, et al. Radial growth of trees in response to climatic factorsin the Altai Mountains, south of Kazakhstan[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 723–733.]

Picea schrenkiana response to climate change at different altitudes in Tianshan Mountains

Shirenna Jiahan[1,2,3], ZHANG Tongwen[2,3], YU Shulong[2,3], JIANG Shengxia[2,3], XU Zhonglin[1]

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;
2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Key Laboratory of Tree-ring Physicochemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: In order to study the difference in the response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate factors at different altitudes, the core samples of schrenk spruce were collected from the low, middle and high altitudes forest areas in the Nilka Kashi river basin of the Western Tianshan Mountains, the tree ring-width standard dendrochronology at different altitude was established. The result of correlation analysis between tree ring chronology and meteorological data showed that, The chronology of the three sampling points mainly responded to temperature and relative humidity, but responded weakly to precipitation. The radial growth of tree ring at high and low altitudes had the same response to temperature and relative humidity, both of which have positive response to temperature, and negative response to relative humidity, while the radial growth at middle altitude was opposite to high and low altitudes. Since the study area occured abrupt climate change in 1991, the width of schrenk spruce appeared the "growth differentiation", the tree-ring width index of low-high altitudes showed a downward trend, while the middle altitude showed an upward trend. Before and after the abrupt transition point, the radial growth of trees had an unstable response to temperature and relative humidity. The positive correlation of the mid-altitude chronology to the temperature from May to September and the negative correlation to the relative humidity were significantly enhanced, The low and high altitude chronology had a significant negative correlation with the temperature from July to August, and a significant positive correlation with the relative humidity from June to August. According to the response model of schrenk spruce to climate factors, the rapid warming will lead to intensified evaporation, and the relative humidity decrease, which may cause negative effects on the growth of schrenk spruce in the low and high altitude forest, and the appropriate temperature increase may promote the growth of schrenk spruce in the middle forest.

Keywords: Tianshan; *Picea schrenkiana*; tree ring; different altitudes; climate change; divergence phenomenon